

ニッケル基超合金単結晶鋳物の凝固制御技術とその 応用に関する研究

著者	吉成 明
号	1715
発行年	1996
URL	http://hdl.handle.net/10097/10522

氏	名	よし	なり	あきら
授	与	吉	成	明
学	位	博	士	(工学)
学	位	授	与	年 月 日
学	位	授	与	平成 8 年 10 月 9 日
学	位	授	与	の 根 拠 法 規
学	位	授	与	学位規則第 4 条第 2 項
最	終	学	歴	昭 和 56 年 3 月
東京工業大学大学院総合理工学研究科材料科専攻修士課程修了				
学	位	論	文	題 目
学	位	論	文	ニッケル基超合金単結晶鋳物の凝固制御技術とその応用に関する研究
論	文	審	査	委 員
論	文	審	査	東北大学教授 新山 英輔 東北大学教授 丸山 公一
論	文	審	査	東北大学教授 粉川 博之

論文内容要旨

本論文は、発電ガスタービン用大型単結晶動翼の開発を目的とし、そのための単結晶製造プロセスである鋳型引き出し式一方向凝固法に関して、①結晶方位の制御を含めた一方向凝固における熱的要因の明確化、②凝固途中における合金元素の蒸発、③単結晶鋳造に必要な低反応性鋳型材の開発、④単結晶材の品質向上を狙った磁場付加の効果、⑤それらの結果に基づく発電ガスタービン用小型動翼及び大型動翼の単結晶化技術の開発、及び一方向凝固技術を適用した他の製品開発をまとめたものであり、7章より構成されている。

第1章 序 論

本章では、本研究を行うにあたっての背景、一方向凝固技術の概略の比較と、研究の対象とした鋳型引き出し式一方向凝固法の特徴及び本研究の目的について述べた。

第2章 一方向凝固における熱的要因の解析および製造装置の試作

2次元円柱モデル及び2次元平板モデルを用いた凝固解析と鋳造実験結果の比較を行い、鋳型引き出し式一方向凝固における熱的要因を検討した。

一方向凝固において最も重要である液相線温度での温度勾配は、鋳型加熱温度の上昇とともに大きくなり、また、鋳物断面形状の拡大する位置では急激に小さくなり、凝固位置が鋳型加熱炉の外に出やすくなることを示した。そして、凝固位置が鋳型加熱炉の外に出ると、凝固海面が下に凸となり鋳型壁から異結晶が発生しやすくなる等、凝固界面を水平にすることの重要性を示した。また、水冷チルプレートの冷却効果があるのは、チルプレートから6 cm位までであり、鋳型引き出し式一方向凝固での冷却は、鋳型表面からの輻射伝熱が主となることから、鋳型表面の輻射率を高め、且つ熱伝導率の高い鋳型材を用いることが有効であることを示した。

更に、鋳型加熱炉出口の加熱を強化した2段加熱では、下段ヒータ温度を高くすることで、鋳物温度を高くせず温度勾配のみを大きくすることが可能であることを示した。

それらの解析結果を基に、高周波サセプタ及び抵抗ヒータからなる2段加熱炉を有した単結晶鋳造炉を試作し、2段加熱の効果を確認した。

第3章 単結晶の成長方位の制御技術

ニッケル基超合金単結晶の成長方位を〈100〉方位に制御することを目的に、種結晶法及びセレクト法について、鑄造実験及び凝固計算による検討を行った。

種結晶法では、単結晶成長は比較的容易であり、種と同方位の単結晶が得られるが、実際の鑄造では種と鑄型との隙間を小さくすることの重要性を示した。

一方、セレクト法では、単結晶の方位はスタータ部の組織と密接な関係があり、スタータの柱状晶をチルプレートから垂直上方に成長させることが必要であり、そのためには、鑄込み温度を高くすると共に、鑄型を合金の液相線温度以上に加熱することが重要である。また、チルプレート表面は、出来るだけ平面が望ましい。以上の結果を基に、チルプレート表面形状、鑄込み温度、鑄型加熱温度を適当に選ぶことにより、方位歩留まり100%（〈100〉方位から10°以内）で丸棒単結晶を鑄造できることを示した。

第4章 蒸発による合金組成変化の抑制と低反応性鑄形の開発

発電ガスタービン用高クロム合金の単結晶動翼鑄造時に問題となる、凝固過程における合金元素の蒸発による組成変化を調べた。ニッケル基超合金溶湯から蒸発する合金元素のほとんどはクロム、コバルト、ニッケルであり、他の合金元素の蒸発量は無視できるほど少ないこと、また、それら元素の中ではクロムの蒸発量が著しく多く、他の元素の変化（増加）はクロムの減少による見掛けの増加で説明できることを示した。またクロムの蒸発を抑制するためには、圧力を 4×10^{-1} Pa 台まで高くし、溶湯表面にアルミナ膜を形成することが効果的であることを示した。

更に、大型動翼の単結晶鑄造に対応するため、低反応性に優れた鑄型の開発を行い、コロイダルシリカをバインダとし、アルミナフィラーとアルミナスタックを用いて作製したアルミナ鑄型が、ニッケル基超合金と反応しないこと、及び粘度管理等実作業での造型性に優れ、一方向凝固法による単結晶翼の鑄造に適用できることを示した。

第5章 一方向凝固過程における磁場付加の効果

本章では、新しい試みとして静磁場中で一方向凝固を行い単結晶の品質向上を狙った。

最初に、アルミニウム合金を用いた基礎実験により、柱状晶が成長し易くなること、鑄物中央部での偏析が低減されることを示した。

ニッケル基超合金を静磁場中で一方向凝固すると、柱状晶鑄物の表面は、結晶粒界の入り組んだ乱れた組織となり、単結晶鑄物の表面では微細等軸晶の連なった典型的なフレックル欠陥が発生し、単結晶製造へ適用できないことがわかった。結晶粒界の入り組んだ組織及びフレックルの発生位置は、N極からS極に向かって左側であり、鑄物形状や鑄型加熱炉内の位置に無関係であるが、鑄型材質や合金の種類、鑄型引き出し速度や、鑄物厚さによって発生が異なることを示し、フレックル発生の新しいモデルを提案した。

第6章 一方向凝固制御技術の応用

第2章から第5章で得られた結果を基に、ニッケル基超合金の2次元形状モデル翼、発電ガスタービン用小型動翼及び大型動翼の単結晶化技術の開発と、他の製品開発への一方向凝固技術の適用化研究の結果をまとめた。

小型動翼の単結晶化では、「ムーンライト計画」の高効率ガスタービン「AGTJ-100B」の高圧タービン用第1段動翼を対象とし、鑄型加熱温度1800～1823K、鑄型引き出し速度10～20cm/hの条件で、単結晶化できることを明らかにした。

大形動翼の単結晶化では、シールフィン、ブラットホーム等の動翼突起部を単結晶化するための新技術「バイパス法」を開発し、その有効性を示すと共に、日立高効率ガスタービン「H-25」の初段動翼（全長175mm）の単結晶化に成功した。更に実機回転試験用単結晶動翼を試作し、平成7年3月からの回転試験に供した。

次に、時期ディスクの薄膜磁気ヘッドのパーマロイ薄膜を作製するのに必要なターゲット材の開発を行い、一方向凝固法とアルミニウム脱酸を適用することで、鉄組成のばらつき範囲が0.1mass%以下、酸素量が15mass ppm以下の高品質パーマロイターゲット材を開発した。

更に、開発したパーマロイターゲット材の低コスト化を目的に、加熱鑄型を用いた簡便な一方向凝固法で、量産用大

型ターゲット材の開発を行った。開発したターゲット材の酸素量は 20mass ppm 以下、鉄成分のばらつきは、 ± 0.1 mass%以内であり偏析は見られなかった。開発ターゲット材で作製したパーマロイ薄膜のスパッタ開始時、及び350回のスパッタリング後の磁歪定数を評価し、長時間の使用が可能であることを確認し製品化した。

また、耐ストレスマイグレーション特性に優れた LSI 配線用ターゲット材の開発を目的に、ニオブウムワイヤーを分散させたアルミニウムの合金の一方凝固を行い、ニオブウムワイヤー分散複合ターゲットを試作し、実用化できる見通しを得た。

また、原子力発電で、中性子照射を受けた時に発生する照射加速応力腐食割れ (IASCC) の防止を目的に、オーステナイト系ステンレス鋼の単結晶鑄造を試み、クロム当量とニッケル当量の比が 1.85 以下で単結晶鑄造が可能であることを明らかにし、単結晶部材を試作した。

第 7 章 結 論

第 6 章までの結果をまとめるとともに、本研究の位置付けを述べて結言とした。

審 査 結 果 の 要 旨

ガスタービンの熱効率向上にはガス温度の上昇が必要であり、この高温に耐える動翼材料として従来航空機用の小型品に限られていたニッケル基超合金の単結晶鋳物製造技術を大型品に適用することが望まれている。本論文はそのため必要な凝固制御技術の基礎研究とその応用に関するものである。

第1章は序論である。鋳型引出式一方向凝固法の特徴と研究目的を述べている。

第2章は一方向凝固の熱解析に関する研究である。多結晶を避け単結晶を実現するうえで固液界面の温度勾配が重要であることを明らかにし、それに対する各種操業条件の影響を実験及び数値解析で調べ、炉内温度分布、鋳物断面積、鋳型引出速度、などの重要性をあきらかにしている。とくに炉内分布を最適化するには出口付近の鋳型加熱を強化することが有効であることを見いだしている。この結果に基づき、新しい2段加熱方式の炉を設計・製作し、性能を確認している。

第3章は単結晶の成長方位の制御に関する研究である。スタータ部の柱状晶を垂直上方に成長させるための鋳造条件、およびセレクトにより柱状晶を選別して1個の単結晶とする過程について実験及び数値計算により検討し、とくにスタータ部の鋳型温度が重要であることを明らかにし、これらの結果を応用することで〈100〉方位からのずれ10度以内の試験片を歩留り100%で製作する条件を確立している。

第4章は凝固時に鋳型内に長時間保持される溶融合金の蒸発及び鋳型との反応の問題に関する検討である。溶融合金からの合金元素の蒸発について実験し、とくにクロームの蒸発が多いことを明らかにし、これを抑制する方法を開発している。また高温で溶融金属との反応性の少ないアルミナ系鋳型材料を開発している。

第5章は凝固中の試験片に対する磁場付加の効果を検討したものであるが、結果として有効な技術とならなかった経過を述べている。

第6章は応用に関するもので、上記の基礎研究結果に基づいて最終的に全長175mmの動翼の製作に成功した経過を述べている。さらに本凝固制御技術の超合金以外の分野への展開として磁性薄膜用スパッターターゲット材、および原子炉用耐食ステンレス材への応用について述べている。

第7章は総括である。

以上要するに本論文はガスタービン動翼などを単結晶として製造するための中核技術としての凝固制御について基本的な問題を解明し、その応用技術まで明らかにしたもので、材料加工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。